



I. Г. Цмоць<sup>1</sup>, О. Я. Різник<sup>1</sup>, Ю. І. Бударецький<sup>2</sup>, М. Я. Олійник<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Національний університет "Львівська політехніка", м. Львів, Україна

<sup>2</sup> Національна академія сухопутних військ ім. гетьмана Петра Сагайдачного, м. Львів, Україна

## СИНТЕЗ БАРКЕРОПОДІБНИХ ПОСЛІДОВНОСТЕЙ З АДАПТАЦІЄЮ ДО ВЕЛИЧИНИ ЗАВАДИ

Вдосконалено метод синтезу завадостійких баркероподібних кодових послідовностей з використанням ідеальних кільцевих в'язанок. Удосконалено метод для швидкого знаходження таких шумоподібних завадостійких кодових послідовностей, які здатні в найбільшому обсязі знаходити і виправляти помилки відповідно до довжини отриманої кодової послідовності. Реалізовано алгоритм для швидкого знаходження таких завадостійких баркероподібних кодових послідовностей, які здатні в найбільшому обсязі знаходити і виправляти помилки відповідно до довжини отриманої кодової послідовності.

Розроблено імітаційну модель завадостійкого баркероподібного кодування з використанням ідеальних кільцевих в'язанок. Досліджено можливість зменшення надлишковості завадостійких кодових послідовностей за допомогою обрізання кодових послідовностей на певну кількість бітів без втрати відновлювальної здатності завадостійких кодів. Виконано теоретичний аналіз можливостей даного підходу та його ефективності. Проведено декілька серій експериментальних досліджень надійності роботи описаного методу на різних вибірках даних та підтверджено його функціональну ефективність. Проведений аналіз отриманих даних та виявлення ключових факторів, що впливають на результат. Здійснено практичну програмну реалізацію імітаційної моделі завадостійкого баркероподібного кодування щодо знаходження та виправлення помилок в отриманих завадостійких баркероподібних кодових послідовностях. Описано використані методи та алгоритми оброблення даних, основні компоненти для оброблення повідомлень та їх призначення.

Досліджено можливість зменшення надлишковості завадостійких кодових послідовностей за допомогою скорочення кодових послідовностей на певну кількість бітів без втрати відновлювальної здатності завадостійких кодів. Виконано теоретичний аналіз можливостей даного підходу та його ефективності. Проведено декілька серій експериментальних досліджень надійності роботи описаного методу на різних вибірках даних та підтверджено його функціональну ефективність. Виконаний аналіз отриманих результатів та визначені основні фактори, що впливають на отриманий результат. Запропоновані завадостійкі баркероподібні кодові послідовності мають практичну цінність, оскільки за допомогою отриманої баркероподібної кодової послідовності досить просто та швидко знаходити до 50 % та виправляти до 25 % спотворених символів від довжини завадостійкої баркероподібної кодової послідовності.

**Ключові слова:** баркероподібна послідовність; завадостійка послідовність; дзеркальна кодова послідовність; ідеальна кільцева в'язанка; нееквідистантна кодова послідовність; нееквідистантна комбінаторна конфігурація.

### Вступ

У військовій галузі, де широко використовуються мобільні інтелектуальні роботи, безпілотні літальні апарати, мікросупутники, різноманітні мобільні транспортні системи, автоматизовані системи управління озброєнням важливою проблемою є організація надійного зв'язку між даними засобами та віддаленим центром керування з забезпеченням відповідного рівня криптографічного захисту та завадостійкості. Не менш важливим таким захист є і для радіолокаційних систем виявлення, супровіду і оцінки координат високодинамічних цілей [16]. Для вирішення такої проблеми розробляються сис-

теми захисту та передачі даних (СЗПД) з використанням баркероподібних кодів, які відносяться до складу шумоподібних сигналів [15]. Такі сигнали дають змогу забезпечити високу роздільну здатність по дальності при великих значеннях її однозначної оцінки, однозначність оцінки швидкості при відсутності "сліпих швидкостей" та високі показники завадозахищеності [5].

Завадозахищеність містить скритність роботи системи зв'язку або радіолокаційної станції і їх завадозастійкість [11]. Завадостійкість – це одна з важливих характеристик систем прийому/передачі даних, яка характеризує здатність системи працювати в умовах природних і організованих завад. Підвищення завадостійкості

при фіксованих швидкостях прийому/передачі даних є актуальною проблемою, наприклад, для керування безпілотниками. Підвищення завадостійкості передачі даних досягається за рахунок збільшення довжини та потужності завадостійкої кодової послідовності, яка використовується для передачі одного повідомлення [13].

Преваги цих послідовностей, такі як висока завадостійкість відповідно до вузькосмугових завад великої потужності, можливість поділу абонентів за кодовою ознакою, скритність передачі, висока стійкість до багатопроменевого поширення, висока роздільна здатність при навігаційних вимірах матимуть широке практичне використання у системах зв'язку та геолокації.

*Об'єкт дослідження* – синтез завадостійких баркероподібних кодових послідовностей з використанням ідеальних кільцевих в'язанок.

*Предмет дослідження* – методи, моделі та засоби синтезу завадостійких кодів з адаптацією до величини завад.

*Мета роботи* – вдосконалення методу та розроблення імітаційної моделі синтезу баркероподібних кодових послідовностей з використанням ідеальних кільцевих в'язанок для підвищення завадостійкості при передачі даних.

Для досягнення зазначеної мети визначено такі основні завдання дослідження:

- вдосконалення методу синтезу баркероподібних кодових послідовностей з використанням ідеальних кільцевих в'язанок;
- розроблення імітаційної моделі для відтворення умов реального середовища передавання даних;
- аналіз поведінки завадостійких баркероподібних послідовностей при зміні параметрів середовища та при вкороченні довжини завадостійкої послідовності.

*Наукова новизна отриманих результатів дослідження* – вперше вдосконалено метод синтезу завадостійких баркероподібних кодових послідовностей з використанням ідеальних кільцевих в'язанок, який за рахунок врахування величини завад забезпечує вибір довжини кодової послідовності; розроблена імітаційна модель синтезу завадостійких баркероподібних кодових послідовностей змінної довжини, яка забезпечує адаптацію довжини кодової послідовності до величини завад.

*Практична значущість результатів дослідження* – використання завадостійких баркероподібних кодових послідовностей на підставі ідеальних кільцевих в'язанок полягає у відновлюванні даних, якщо пошкоджено не більш, ніж 25 % бітів кожної кодової послідовності, та дає змогу виявляти пошкодження даних, що викликані завадами, якщо кількість таких не перевищує 50 % бітів у кожній кодовій послідовності.

*Матеріали та методи дослідження.* Використано: теорію комбінаторного аналізу та завадостійкого кодування – для синтезу баркероподібних кодових послідовностей змінної довжини; методи структурного та об'єктно-орієнтованого програмування – для розроблення імітаційної моделі синтезу баркероподібних кодових послідовностей змінної довжини.

*Аналіз останніх досліджень та публікацій.* Розроблення алгоритмів та методів для завадостійкого кодування з використанням шумоподібних кодів на підставі баркероподібних послідовностей розглядалась у

багатьох роботах [1], [3]. Алгоритми кодування та декодування в режимі реального часу з використанням послідовностей Баркера були розглянуті в роботі [10]. Бездротові системи захисту, стиснення та передачі даних у режимі реального часу з визначеними параметрами описані в роботі [5]. Алгоритм пошуку та виправлення завад на підставі баркероподібних послідовностей показаний у роботі [8]. У роботі [6] представлена робота в режимі реального часу для одночасного радіолокаційного та просторового захищеного зв'язку.

Розроблення методів і засобів завадостійкого кодування з використанням шумоподібних кодів на підставі баркероподібних послідовностей висвітлені в працях, зокрема: С. Мацуюкі, А. Цунеда, М. Кельман та Ф. Рівест – алгоритм кодування та декодування в реальному часі за допомогою послідовностей Баркера [2], [4]; А. М. Н. Алджалаї, К. Фенг, В. К. М. Леунг і Р. Уорд – безпроводні системи захисту, стиснення та передачі даних у реальному часі з заданими параметрами [1]; Е. В'єнно та Б. Байрам – алгоритм знаходження та виправлення завад на підставі баркероподібних послідовностей [14]; П. Родрігес-Гарсія, Г. Ледфорд, К. Бейліс та Р. Дж. Маркс – робота в системах реального часу для одночасного радіолокаційного та просторово захищеного зв'язку роботи [10].

Питання розроблення методів, алгоритмів і структур завадостійкого кодування-декодування даних та синтезу на їх основі систем захисту даних у реальному часі висвітлені в працях, зокрема, М. Кельмана – методи виправлення завад із застосуванням кодів Баркера [2].

Проте у цих працях мало уваги надано застосуванню при розробці систем захисту та передачі даних у реальному часі сучасних швидких моделей та алгоритмів. Окрім цього, недостатньо розглянутими є питання поєднання в межах комплексних систем засобів завадостійкого кодування.

## Результати дослідження та їх обговорення

Послідовність Баркера задають таким математичним формулюванням

$$\{a_i\}_{i=1}^N \mid a_i \in \{+1, -1\}. \quad (1)$$

Загальний коефіцієнт автокореляції функції визначають як

$$c_j = \sum_{i=1}^{N-j} a_i a_{i+j}. \quad (2)$$

Автокореляційна функція задають таким виразом:

$$R(j) = \sum_{i=1}^{N-j} a[i] a^*[i+j]. \quad (3)$$

А рівень головної повноти визначають через вираз:

$$ML = \left| \sum_{i=1}^{N-j} a_i a_i \right| = N. \quad (4)$$

Для спрощення та покращання результатів вирішення завдання актуальним є вироблення нового підходу до синтезу кодів з добрими автокореляційними властивостями, які наближаються до кодів Баркера. Один з цих підходів базується на синтезі баркероподібних кодових послідовностей за допомогою ідеальних кільцевих в'язанок. Розроблений в роботі метод побудови баркероподібних кодових послідовностей змінної довжини, заснований на використанні властивостей підкласу

в'язанкових структур – багатократних ідеальних кільцевих в'язанок (ІКВ).

Багатократна ідеальна кільцева в'язанка представляє комбінаторну конфігурацію, яка утворена на послідовності  $N$  цілих чисел  $K_N = (k_1, k_2, \dots, k_i, \dots, k_N)$ , де всі суми  $1, 2, \dots, S_N^R = S_N - 1$  з поруч розташованих чисел є значенням  $R$  різних кільцевих сум [9].

Відомо співвідношення, що об'єднує кількість чисел  $N$ , кратність  $R$  та суму  $S_N$  всіх чисел  $R$  – кратної ідеальної кільцевої в'язанки:

$$S_N = \frac{N(N-1)}{R} + 1. \quad (5)$$

Для побудови баркероподібної кодової послідовності змінної довжини за допомогою ІКВ зі значеннями порядку  $N$  кратності  $R$  виділяємо рядок із  $S_N$ , де пронумеровані у зростаючому порядку елементи одновимірного масиву і які заповнені "1" при умові що номери елементів співпадають з числами ІКВ. У всі інші елементи ма-

сиву, які залишилися незаповненими, заносимо "-1". Отримана послідовність з одиниць і нулів буде  $S_N$  – розрядною баркероподібною кодовою послідовністю змінної довжини, циклічним зсувом якої можна отримати й решту дозволених комбінацій цієї послідовності.

Наведемо приклад такої баркероподібної кодової послідовності в таблиці кодових комбінацій, що утворена на підставі ІКВ порядку  $N=9$  та кратності  $R=4$  (див. табл. 1):

$$1. 1. 1. 2. 2. 5. 1. 3. 3. \quad (6)$$

Будь-яка з цих  $S_N(S_N - 1) / 2$  різних пар кодових комбінацій послідовності містить точно  $R$  із  $N$  одиничних значень в однойменних розрядах, що відповідає властивостям ІКВ. Інші  $N-R$  елементів однієї і циклічно зсунутої іншої баркероподібної кодової послідовності відрізняються від елементів, що розташовані в однойменних розрядах послідовності.

Табл. 1. Баркероподібна кодова послідовність на підставі ІКВ з  $N=9$  та  $R=4$

1	1	1	1	-1	1	-1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	-1
-1	1	1	1	1	-1	1	-1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	-1
-1	-1	1	1	1	1	-1	1	-1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	-1	-1	1
1	-1	-1	1	1	1	1	-1	1	-1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	-1	-1
-1	1	-1	-1	1	1	1	1	-1	1	-1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	-1
-1	-1	1	-1	-1	1	1	1	1	-1	1	-1	1	-1	-1	-1	-1	1	1
1	-1	-1	1	-1	-1	1	1	1	1	-1	1	-1	1	-1	-1	-1	-1	1
1	1	-1	-1	1	-1	-1	1	1	1	1	-1	1	-1	1	-1	-1	-1	-1
-1	1	1	-1	-1	1	-1	-1	1	1	1	1	-1	1	-1	1	-1	-1	-1
-1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	-1	1	1	1	1	-1	1	-1	1	-1	-1
-1	-1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	-1	1	1	1	1	-1	1	-1	1
1	-1	-1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	-1	1	1	1	1	-1	1	-1
-1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	-1	1	1	1	1	-1	1
1	-1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	-1	1	1	1	1	-1
-1	1	-1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	-1	1	1	1	1
1	-1	1	-1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	-1	1	1	1
1	1	-1	1	-1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	-1	1	1
1	1	1	-1	1	-1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	-1	1

Тоді мінімальна кодова відстань даної баркероподібної кодової послідовності відповідає формулі:

$$d_{\min} = 2(N - R). \quad (7)$$

Кількість помилок, які виявляються  $t_1$ , і кількість помилок, які виправляються  $t_2$  за допомогою баркероподібної кодової послідовності, визначаються на підставі мінімальної кодової відстані:

$$t_1 \leq 2(N - R) - 1, t_2 \leq N - R - 1. \quad (8)$$

Для наведеного прикладу формули (5), (7), (8) приймають наступні значення:

$$S_9 = \frac{9(9-1)}{4} + 1 = 19, d_{\min} = 2(9-4) = 10, \\ t_1 \leq 2(9-4) - 1 = 9, t_2 \leq 9-4-1 = 4. \quad (9)$$

Наведемо формули, що визначають кількість помилок, які можуть бути виявлені  $t_1$  та кількість помилок, які можуть бути виправлені  $t_2$  баркероподібною кодовою послідовністю:

$$t_1 \leq 2(N - R) - 1, t_2 \leq N - R - 1. \quad (10)$$

Кодову відстань можна визначати через параметри ІКВ:

$$d_{\min} = S_N - 2(N - R). \quad (11)$$

Представимо формули визначення кількості помилок, які можуть бути виявлені чи виправлені на підставі баркероподібної кодової послідовності:

$$t_1 \leq 2(N - R) - 1, t_2 \leq N - R - 1 \quad \left. \vphantom{t_1} \right\}, \text{ при } S_N \geq 4(N - R); \quad (12)$$

$$t_1 \leq S_N - 2(N - R) - 1, t_2 \leq \frac{S_N - 2(N - R + 1)}{2} \quad \left. \vphantom{t_1} \right\}, \text{ при } S_N < 4(N - R); \quad (13)$$

У наведених випадках значення параметрів  $N$  і  $R$  не пов'язані між собою якоюсь залежністю і вибираються довільно. В такому випадку виникає задача про встановлення найкращого співвідношення між  $N$  і  $R$ , за умови якого розглянута баркероподібна кодова послідовність набуває додаткових властивостей щодо завадостійкості. Завадостійкість баркероподібної кодової послідовності значно збільшується зі зростанням різниці  $P = N - R$ .

Найбільше значення різниці  $P$  досягається за виконання умови:

$$S_N = 2N. \quad (14)$$

Співвідношення між вибраними параметрами  $N$  і  $R$ , коли баркероподібна кодова послідовність здатна виявляти та виправляти найбільшу кількість помилок:

$$P = \begin{cases} N/2, & N - \text{парне} \\ (N-1)/2, & N - \text{непарне} \end{cases}. \quad (15)$$

Метод побудови баркероподібних кодових послідовностей змінної довжини на підставі ІКВ за критерієм мінімуму автокореляційної функції полягає в такому:

- вибрати необхідний варіант ІКВ за довжиною  $L_N$  баркероподібної кодової послідовності, який відповідає сумі елементів ІКВ  $S_N$  порядку  $N$  кратності  $R$  [9];
- побудувати  $L_N$  – позиційний код  $\mu_i, i = 1, 2, \dots, L_N$  з мінімальною автокореляційною функцією на підставі вибраної ІКВ  $(k_1, k_2, \dots, k_l, \dots, k_N)$ , де на  $N$  позиціях кодової послідовності з номерами елементів  $x_l, l = 1, 2, \dots, N$ , які обчислюються з формули  $x_l \equiv 1 + \sum_{i=1}^l k_i \pmod{L_N}$ , розмістити значення "1", а на решті  $L_N - N$  позиціях кодової послідовності – значення "0".

Побудовані на підставі ІКВ баркероподібні кодові послідовності змінної довжини дають змогу виявляти до  $N-1$  помилок, що відповідає 50 % від довжини кодової послідовності або виправляти до  $N/2-1$  помилок, що відповідає 25 % від довжини кодової послідовності для парних, і виявляти до  $N$ , що відповідає 50 % від довжини кодової послідовності або виправляти до  $(N-1)/2$  помилок, що відповідає 25 % від довжини кодової послідовності для непарних значень  $N$ .

Для отримання баркероподібних послідовностей (кодів) (БпК) був розроблений програмний продукт їх автоматичного пошуку для визначеної змінної довжини.

Структура компонент імітаційної моделі синтезу баркероподібних послідовностей змінної величини складається з трьох основних компонент системи:

- інтерфейс користувача;
- менеджер потоків;
- алгоритмічне ядро пошуку баркероподібних послідовностей.

На рис. 1 наведено структуру та взаємодію компонент імітаційної моделі.

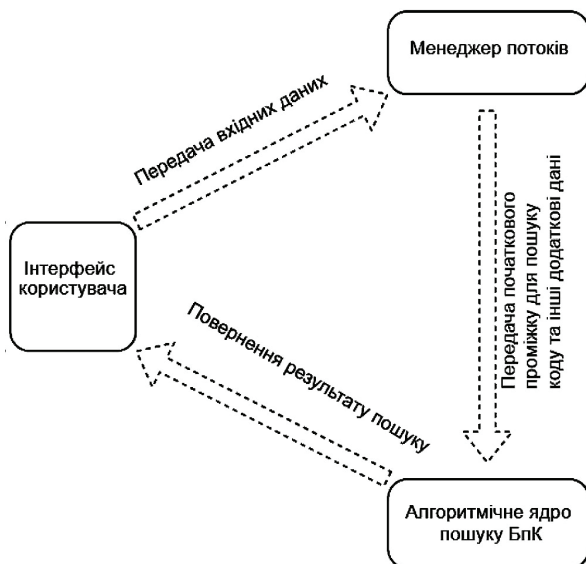


Рис. 1. Структура та взаємодія компонент імітаційної моделі синтезу баркероподібних послідовностей змінної величини

Програмний продукт реалізований за допомогою мови програмування C та деяких бібліотек для отримання додаткових функцій, як-от розподілення часу виконання за допомогою паралельних потоків. Загалом,

програмний продукт виконує пошук баркероподібних послідовностей довжиною до 64. Таке обмеження має дві причини:

- для пришвидшення роботи з обчисленнями, алгоритм роботи програми працює з бітовими полями чисел. Отже, замість використання масивів даних, програма зберігає кодові послідовності у одній змінній;
- швидкість пошуку кодових послідовностей з порядком 30 і вище є досить повільним процесом, складність якого росте геометрично  $(x2,1)$ . Для спрощення такої роботи, необхідно обмежити проміжок доступних довжин масиву.

Програма виконує перебір послідовностей заданого порядку в певному проміжку чисел. Для спрощення пошуку, та використовуючи емпіричну властивість баркероподібних послідовностей, ми перевіряємо тільки одну половину діапазону, оскільки у другій знаходяться такі ж самі, але обернені побітово елементи. Також, для прискорення пошуку баркероподібних послідовностей, було здійснено ряд оптимізацій кодової послідовності та перенесення її інфраструктури у багатопоточне середовище.

Загальна структура програмного продукту містить три головні компоненти, кожен з яких має також додатковий пов'язаний функціонал. Загальна діаграма структури виглядає так (рис. 2). Алгоритм роботи програмного продукту базується на прямому пошуку баркероподібних послідовностей за допомогою функцій перевірки та збереження значення коду.

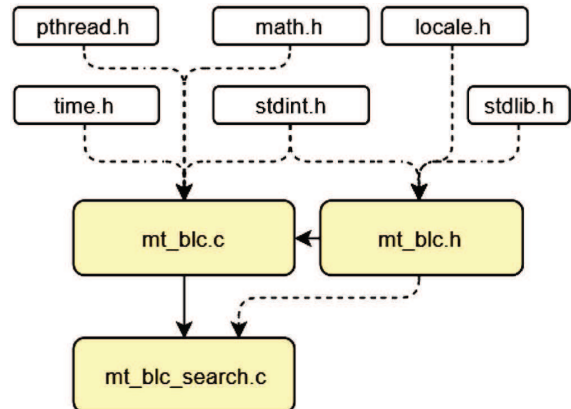


Рис. 2. Діаграма структури програмного продукту

Загальний алгоритм програми представлений на рис. 3. Із блок-схеми алгоритму бачимо, що робота програми розпочинається з перевірки правильності введених користувачем параметрів. Ця процедура необхідна для зупинки виконання програми у разі помилкових вхідних даних, що дасть змогу зберегти користувача від витрат часу та вирішення помилок у ході виконання програми.

Наступним етапом є ініціалізація м'ютекса. М'ютекси – це об'єкти, за допомогою яких відбувається синхронізація доступу декількох потоків програми до спільного ресурсу. Синхронізація є важливим етапом роботи програми, оскільки у випадку її відсутності, невпорядкований запис даних про знайдені баркероподібні послідовності може призвести до багаторазового перезапису результатів, їх пошкодження чи аварійної зупинки програми. Після ініціалізації, програма створює інші потоки виконання, які займатимуться перебором всіх кодів у заданому проміжку. Межі проміжку задаються у

параметрах ініціалізації потоку головним потоком програми, а потім передаються у кожен окремий потік де використовуються для індексування по заданому проміжку кодів.

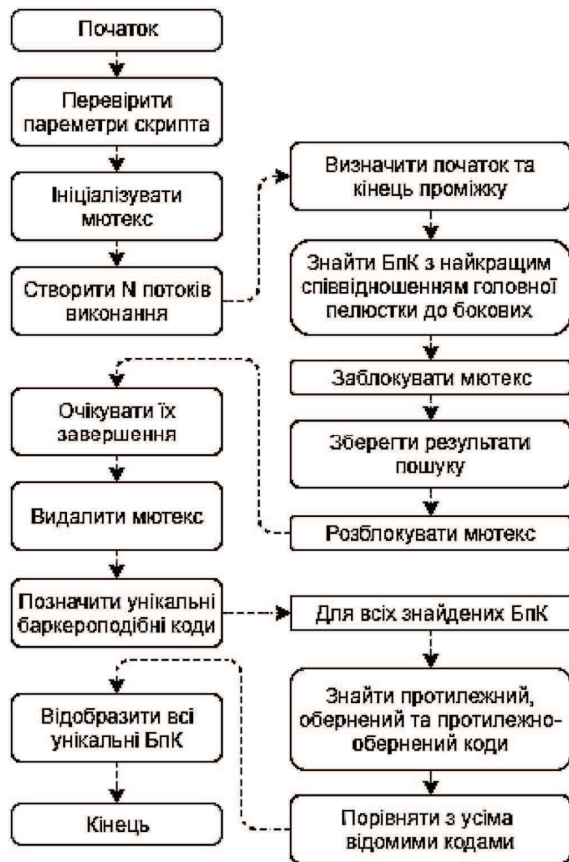


Рис. 3. Блок-схема алгоритму роботи програми

Кожен потік, створений головним процесом, виконує пошук найкращих баркероподібних послідовностей

```

Знайдено наступні UBBLС коди:
..... | ..... | ..... | ..... | ..... | ..... | ..... | ..11 1001
..... | ..... | ..... | ..... | ..... | ..... | ..... | ..11 1011
..... | ..... | ..... | ..... | ..... | ..... | ..... | ..11 1010
..... | ..... | ..... | ..... | ..... | ..... | ..... | ..11 1101
..... | ..... | ..... | ..... | ..... | ..... | ..... | ..11 0100
..... | ..... | ..... | ..... | ..... | ..... | ..... | ..11 0010
..... | ..... | ..... | ..... | ..... | ..... | ..... | ..10 1110
..... | ..... | ..... | ..... | ..... | ..... | ..... | ..10 0001

Знайдено 8 UBBLС коди з відхиленням 2 за 0.003386 сек [всього: 0.010113 сек].
oleksandr@creo2:~/projects/project_blc$ ./blc_search 13
Знайдено наступні UBBLС коди:
..... | ..... | ..... | ..... | ..... | ..... | ...1 1111 | 0011 0101

Знайдено 1 UBBLС коди з відхиленням 1 за 0.003699 сек [всього: 0.012287 сек].
oleksandr@creo2:~/projects/project_blc$ ./blc_search 14
Знайдено наступні UBBLС коди:
..... | ..... | ..... | ..... | ..... | ..... | ..11 1111 | 0011 0101
..... | ..... | ..... | ..... | ..... | ..... | ..11 1110 | 1011 0011
..... | ..... | ..... | ..... | ..... | ..... | ..11 1110 | 0110 1011
..... | ..... | ..... | ..... | ..... | ..... | ..11 1110 | 0110 1010
..... | ..... | ..... | ..... | ..... | ..... | ..11 1110 | 0110 0101
..... | ..... | ..... | ..... | ..... | ..... | ..11 1110 | 0010 1001
..... | ..... | ..... | ..... | ..... | ..... | ..11 1101 | 0110 0110
..... | ..... | ..... | ..... | ..... | ..... | ..11 1101 | 0100 1100
..... | ..... | ..... | ..... | ..... | ..... | ..11 1100 | 1101 0100
..... | ..... | ..... | ..... | ..... | ..... | ..11 1100 | 1100 1010
..... | ..... | ..... | ..... | ..... | ..... | ..11 1000 | 1010 0100
..... | ..... | ..... | ..... | ..... | ..... | ..11 0011 | 0000 0101
..... | ..... | ..... | ..... | ..... | ..... | ..11 0000 | 0100 1010
..... | ..... | ..... | ..... | ..... | ..... | ..10 1101 | 1111 0001
..... | ..... | ..... | ..... | ..... | ..... | ..10 1011 | 1110 0110
..... | ..... | ..... | ..... | ..... | ..... | ..10 1011 | 0011 1110
..... | ..... | ..... | ..... | ..... | ..... | ..10 1001 | 1000 0001
..... | ..... | ..... | ..... | ..... | ..... | ..10 1000 | 0001 1001

Знайдено 18 UBBLС коди з відхиленням 2 за 0.003383 сек [всього: 0.013639 сек].

```

Рис. 4. Виведення результату пошуку кодів для послідовностей довжиною 6, 13 та 14 чисел

за методом упорядкованого перебору. Проміжок кодів для виконання перебору визначається параметрами, які були передані цьому потоку під час його створення. Кожен варіант кодової послідовності, що дає найкращий результат, зберігається до місцевого буфера, де він зберігається до моменту завершення перебору, або до знаходження кращого коду.

Після завершення перебору всіх послідовностей з певного набору, потік має повернути отримані результати в головний процес. Для цього використовується глобальний масив найкращих баркероподібних послідовностей, який доступний для всіх потоків одночасно. Для уникнення проблем із несинхронізованим записом до спільних ділянок пам'яті, потоки, перед тим, як записати свої результати, намагаються зайняти м'ютекс. Той потік, якому вдалось його зайняти, отримує право на запис до загального масив найкращих кодів. Після завершення запису своїх результатів, потік звільняє м'ютекс для інших потоків і завершує своє виконання.

Головний потік очікує на завершення роботи всіх потоків, після чого він видаляє м'ютекс і починає оброблення результатів розрахунку. У спільному масиві таких результатів програма шукає унікальні кодові послідовності, відсіюючи в них повторення. Потім створюються три копії унікальних баркероподібних послідовностей, які є зміненими варіантами самих кодів. Вони створюються за допомогою операцій віддзеркалювання, інверсії та обох одночасно. Отже, програма отримує всі можливі варіанти унікальних баркероподібних послідовностей, серед яких вона знову шукає повторення та відкидає їх. Наприкінці виконання таких дій отримуємо набір абсолютно унікальних баркероподібних послідовностей, які програма виведе у зручному для перегляду вигляді та з усіма допоміжними даними.

Результатом виконання програми є перелік унікальних баркероподібних послідовностей з найбільшим показником надійності захисту даних. На рис. 4 відображено приклади результату виконання для 6, 13 та 14 порядкових кодів. "0" позначає -1, а 1 позначає 1. З цього рисунку видно, що залежно від довжини необхідної кодової послідовності, отримуємо різну кількість знайдених кодових комбінацій. Отримані кодові послідовності відсортовані за спаданням значення двійкового числа, а формат виведених даних дає змогу легко їх опрацювати та застосовувати у подальших дослідженнях.

**Обговорення результатів дослідження.** Для кращого сприйняття та подальшого аналізу отриманих результатів побудуємо графіки. Графіки на рис. 5 відображають зростання тривалості обчислень залежно від кількості елементів у шуканій послідовності. На рис. 5,а графік має абсолютну вертикальну вісь, яка не завжди є зручною для загального аналізу. На рис. 5,б графік базується на експоненційній шкалі – це дає змогу краще побачити співвідношення між різними розмірностями конфігурацій.

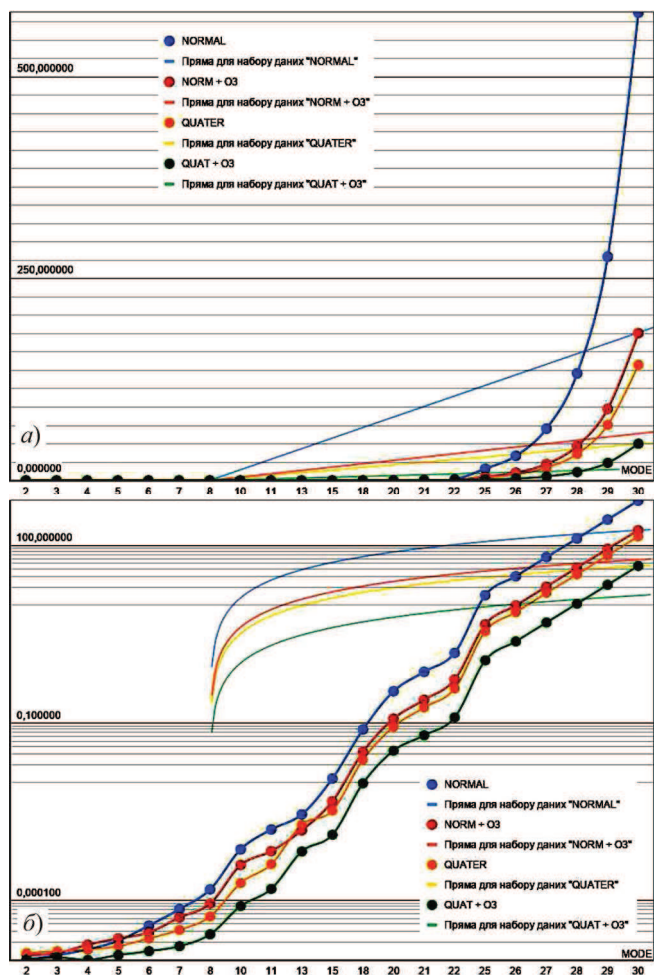


Рис. 5. Залежність тривалості пошуку від розміру послідовності

На рис. 6,а відображено зміну швидкості роботи програми як без, так і з використанням багатопоточності. Після переходу архітектури коду від однопоточного до багатопоточного типу тривалість роботи програми стала меншою у чотири рази.

На рис. 6,б показано кількість знайдених унікальних елементів для кожного із ступенів масиву. Для переві-

ки коректної роботи програми були протестовані відомі наявні результати баркероподібних послідовностей. Внаслідок роботи програми співпали всі варіанти відомих наявних баркероподібних послідовностей з результатами синтезу.

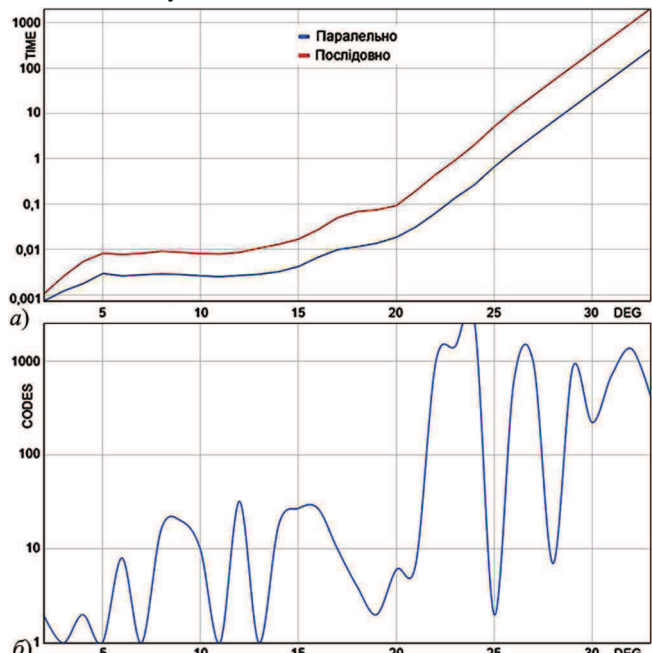


Рис. 6. Залежність: тривалості послідовного та паралельного пошуку від розміру послідовності (а), кількості знайдених БпК від довжини послідовності (б)

Результати тестування наведені на рис. 7, де:  $N$  – довжина баркероподібної послідовності;  $g_{2,N}$  – кількість варіантів баркероподібних послідовностей;  $P_{i,j}$  – варіанти отриманих баркероподібних послідовностей. У першій колонці рис. 7 вказана кількість елементів в баркероподібній послідовності в порядку зростання, в другій – кількість отриманих при цьому баркероподібних послідовностей, в третій – приклади деяких баркероподібних послідовностей  $P_{i,j}$ , що ілюструють представлений раніше матеріал.

Отже, можна стверджувати, що розроблена програма працює коректно і за її допомогою є можливість синтезувати баркероподібні послідовності змінної довжини за критерієм мінімуму автокореляційної функції.

## Висновки

Вдосконалено метод синтезу завадостійких баркероподібних кодових послідовностей з використанням ідеальних кільцевих в'язанок.

Удосконалено метод для швидкого знаходження таких завадостійких кодових послідовностей, які здатні в найбільшому обсязі знаходити і виправляти помилки відповідно до довжини отриманої кодової послідовності.

Здійснено програмну реалізацію імітаційної моделі завадостійкого баркероподібного кодування щодо знаходження та виправлення помилок в отриманих завадостійких баркероподібних кодових послідовностей.

Досліджені завадостійкі баркероподібні кодові послідовності мають практичну цінність, оскільки за допомогою отриманої кодової послідовності досить просто та швидко знаходити до 50 % та виправляти до 25 % спотворених символів від довжини завадостійкої кодової послідовності.

$N$	$g_{2,N}$	$(P_{i,j})$
2	1	1,-1
3	3	1,1,-1; 1,-1,1; 1,-1,-1
4	6	1,-1,-1,1; 1,1,-1,-1; 1,1,-1,1; 1,-1,1,1; 1,1,1,-1; 1,-1,-1,-1
5	12	1,1,1,-1,-1; 1,1,-1,-1,-1; 1,1,-1,1,1; 1,1,1,-1,1; 1,-1,-1,-1,1
6	14	1,-1,-1,-1,-1,1; 1,1,-1,1,-1,-1; 1,1,1,-1,1,1; 1,1,-1,1,1,1; 1,1,1,1,-1,1
7	20	1,-1,-1,-1,-1,-1,1; 1,1,1,1,-1,1,1; 1,1,-1,1,1,1,1; 1,1,-1,1,-1,1,1
8	32	1,-1,-1,1,-1,-1,-1,1; 1,-1,-1,-1,1,-1,-1,1; 1,1,1,-1,1,-1,1,1
9	40	1,-1,1,1,1,-1,-1,1; 1,-1,-1,1,1,1,-1,1; 1,1,1,-1,1,-1,-1,1,1
10	20	1,1,1,1,-1,1,-1,-1,1,1; 1,1,-1,-1,1,-1,1,1,1; 1,1,1,1,-1,-1,1,1,-1,1
11	30	1,1,1,1,-1,1,-1,1,1,-1,-1; 1,1,-1,-1,1,-1,1,-1,-1,-1,-1; 1,1,1,1,1,-1,1,1,-1,-1,1,1; 1,1,1,-1,1,-1,1,1,-1,1,1; 1,1,-1,1,-1,1,-1,-1,1,1
12	64	1,1,1,1,-1,-1,1,-1,1,1,1; 1,1,-1,1,-1,-1,1,1,1,1; 1,1,1,1,-1,1,-1,1,-1,1,1; 1,1,1,-1,1,-1,1,1,-1,-1,1,1; 1,1,-1,-1,1,-1,1,-1,1,1,1
13	46	1,1,1,1,-1,1,-1,1,1,-1,-1,1,1; 1,1,-1,-1,1,1,-1,1,-1,1,1,1; 1,1,1,-1,1,1,1,-1,-1,1,-1,1,1; 1,1,-1,1,-1,-1,1,1,1,-1,1,1
14	36	1,1,1,1,1,-1,-1,1,1,-1,1,1,1; 1,1,-1,1,-1,1,1,-1,-1,1,1,1,1,1; 1,1,-1,1,-1,1,1,-1,-1,1,1,1,1; 1,1,-1,-1,1,1,-1,1,-1,1,1,1,1,1
15	52	1,1,-1,1,-1,1,1,-1,-1,1,1,1,1,1; 1,1,1,1,1,1,-1,-1,1,1,-1,-1,1,1; 1,1,1,1,-1,1,-1,1,-1,-1,1,1,-1,1,1; 1,1,1,1,-1,1,1,1,-1,-1,-1,1,-1,1,1
16	40	1,1,1,1,-1,-1,-1,1,-1,1,1,-1,1,1; 1,1,1,1,-1,-1,1,1,-1,-1,1,-1,1,1,1; 1,1,-1,1,1,-1,1,-1,-1,-1,1,1,1,1
17	16	1,1,1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,1,-1,-1,-1,1,-1,-1; 1,1,1,1,-1,-1,-1,1,-1,-1,1,-1,-1,-1,-1,-1; 1,1,1,-1,1,1,1,-1,-1,-1,1,1,1,-1,1,-1
18	8	1,1,1,1,1,-1,1,-1,-1,1,1,1,-1,-1,1,1; 1,1,-1,-1,1,1,1,-1,1,-1,-1,1,1,1,1,1; 1,1,1,1,-1,-1,-1,1,-1,1,-1,1,1,-1,-1,1
19	4	1,1,1,1,-1,-1,-1,1,1,1,-1,1,1,-1,1,1; 1,1,1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,1,-1,-1,-1,1,-1,-1,1; 1,-1,1,1,-1,1,1,1,-1,1,1,1,-1,-1,-1,1,1,1; 1,-1,1,-1,-1,1,-1,-1,1,-1,-1,1,1,-1,-1,1,1,1
20	12	1,1,1,1,1,-1,1,1,-1,-1,1,-1,1,1,-1,-1,1; 1,-1,-1,-1,1,1,-1,1,-1,-1,1,1,-1,1,1,1,1
21	12	1,1,1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1; 1,1,-1,-1,-1,-1,1,1,-1,1,1,1,-1,-1,1,1,-1,1

Рис. 7. Скріншот результатів синтезу баркероподібних послідовностей

## References

- [1] Aljalai, A. M. N., Feng, C., Leung, V. C. M., & Ward, R. (2020). Improving the Energy Efficiency of DFT-s-OFDM in Uplink Massive MIMO with Barker Codes. 2020 *International Conference on Computing, Networking and Communications* (ICNC), Big Island, HI, USA, 731–735. <https://doi.org/10.1109/ICNC47757.2020.9049829>
- [2] Kellman, M., Rivest, F., Pechacek, A., Sohn, L., & Lustig, M. (2017). Barker-Coded node-pore resistive pulse sensing with built-in coincidence correction. 2017 *IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing* (ICASSP), New Orleans, LA, 1053–1057. <https://doi.org/10.1109/ICASSP.2017.7952317>
- [3] Lakshmi, C. R., Trivikramarao, D., Subhani, S., & Ghali, V. S. (2018). Barker coded thermal wave imaging for anomaly detection. 2018 *Conference on Signal Processing and Communication Engineering Systems* (SPACES), Vijayawada, India, 198–201. <https://doi.org/10.1109/SPACES.2018.8316345>
- [4] Matsuyuki, S., & Tsuneda, A. (2018). A Study on Aperiodic Auto-Correlation Properties of Concatenated Codes by Barker Sequences and NFSR Sequences. 2018 *International Conference on Information and Communication Technology Convergence* (ICTC), Jeju, 664–666. <https://doi.org/10.1109/ICTC.2018.8539367>
- [5] Omar, S. M., Kassem, F., Mitri, R., Hijazi, H., & Saleh, M. (2015). A novel barker code algorithm for resolving range ambiguity in high PRF radars. 2015 *European Radar Conference* (EuRAD), Paris, 81–84. <https://doi.org/10.1109/EuRAD.2015.7346242>
- [6] Pilsu, Kim, Eunji, Jung, Sua, Bae, Kangsik, Kim, & Tai-kyong, Song (2016). Barker-sequence-modulated golay coded excitation technique for ultrasound imaging. 2016 *IEEE International Ultrasonics Symposium* (IUS), Tours, 1–4. <https://doi.org/10.1109/ULTSYM.2016.7728737>
- [7] Riznyk, O., Povshuk, O., Kynash, Y. & Yurchak, I. (2017). Composing method of anti-interference codes based on non-equidistant structures. 2017 *XIIIth International Conference on Perspective Technologies and Methods in MEMS Design* (MEMSTECH), Lviv, 15–17. <https://doi.org/10.1109/MEMSTECH.2017.7937522>
- [8] Riznyk, O., Povshuk, O., Kynash, Y., Nazarkevich, M., & Yurchak, I. (2018). Synthesis of non-equidistant location of sensors in sensor network. 2018 *XIV-th International Conference on Perspective Technologies and Methods in MEMS Design* (MEMSTECH), Lviv, 204–208. <https://doi.org/10.1109/MEMSTECH.2018.8365734>
- [9] Riznyk, O., Povshuk, O., Noga, Y., & Kynash, Y. (2018). Transformation of Information Based on Noisy Codes. 2018 *IEEE Second International Conference on Data Stream Mining & Processing* (DSMP), Lviv, 162–165. <https://doi.org/10.1109/DSMP.2018.8478509>
- [10] Rodriguez-Garcia, P., Ledford, G., Baylis, C., & Marks, R. J. (2019). Real-Time Synthesis Approach for Simultaneous Radar and Spatially Secure Communications from a Common Phased Array. 2019 *IEEE Radio and Wireless Symposium* (RWS), Orlando, FL, USA, 1–4. <https://doi.org/10.1109/RWS.2019.8714503>
- [11] Rosli, S. J., Rahim, H., Ngadiran, R., Abdul Rani, K. N., Ahmad, M. I., & Wee, F. H. (2018). Design of Binary Coded Pulse Trains with Good Autocorrelation Properties for Radar Communications. 2018 *MATEC Web of Conferences*. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201815006016>
- [12] Tsmots, I., Rabyk, V., Riznyk, O., & Kynash, Y. (2019). Method of Synthesis and Practical Realization of Quasi-Barker Codes. 2019 *IEEE 14th International Conference on Computer Sciences and Information Technologies* (CSIT), Lviv, Ukraine, 76–79. <https://doi.org/10.1109/STC-CSIT.2019.8929882>
- [13] Tsmots, I., Riznyk, O., Rabyk, V., Kynash, Y., Kustra, N., & Logoida, M. (2020). Implementation of FPGA-Based Barkers-Like Codes. In: Lytvynenko, V., Babichev, S., Wójcik, W., Vynokurova, O., Vyshemyrskaya, S., Radetskaya, S. (Eds). *Lecture Notes in Computational Intelligence and Deci-*

- sion Making. ISDMCI 2019. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, Vol. 1020, pp. 203–214. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-26474-1\\_15](https://doi.org/10.1007/978-3-030-26474-1_15)
- [14] Viennau, E., & Byram, B. (2020). Compound Barker-Coded Excitation for Increased Signal-to-Noise Ratio and Penetration Depth in Transcranial Ultrasound Imaging. 2020 *IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS)*, Las Vegas, NV, USA, 1–4. <https://doi.org/10.1109/IUS46767.2020.9251650>
- [15] Wang, M., Cong, S., & Zhang, S. (2018). Pseudo Chirp-Barker-Golay coded excitation in ultrasound imaging. 2018 *Chinese Control And Decision Conference (CCDC)*, Shenyang, 4035–4039. <https://doi.org/10.1109/CCDC.2018.8407824>
- [16] Wang, S., & He, P. (2018). Research on Low Intercepting Radar Waveform Based on LFM and Barker Code Composite Modulation. 2018 *International Conference on Sensor Networks and Signal Processing (SNSP)*, Xian, China, 297–301. <https://doi.org/10.1109/SNSP.2018.00064>

**I. H. Tsmots<sup>1</sup>, O. Ya. Riznyk<sup>1</sup>, Yu. I. Budaretskyi<sup>2</sup>, M. Ya. Oliinyk<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine

<sup>2</sup>Hetman Petro Sahaidachnyi National Army Academy, Lviv, Ukraine

## SYNTHESIS OF BARKER-LIKE SEQUENCES WITH ADAPTATION TO THE SIZE OF THE INTERFERENCE

The method of synthesis of noise-resistant barker-like code sequences with the use of ideal ring bundles has been improved. The method for fast finding of such noise-like noise-resistant code sequences, which are able to find and correct errors in accordance with the length of the obtained code sequence, has been improved. An algorithm is implemented to quickly find such noise-resistant barker-like code sequences that are able to find and correct errors in accordance with the length of the obtained code sequence.

A simulation model of noise-tolerant barker-like coding with the use of ideal ring bundles has been developed. The possibility of reducing the redundancy of noise-tolerant code sequences by cutting code sequences by a certain number of bits without losing the regenerative capacity of noise-tolerant codes has been investigated. Theoretical analysis of the possibilities of this approach and its effectiveness is performed. Several series of experimental studies of the reliability of the described method on different data samples were performed and its functional efficiency was confirmed. The analysis of the obtained data and identification of key factors influencing the result is carried out.

The practical software implementation of the simulation model of noise-tolerant barker-like coding for finding and correcting errors in the obtained noise-tolerant barker-like code sequences is carried out. The used methods and algorithms of data processing, the main components for message processing and their purpose are described.

The possibility of reducing the redundancy of noise-tolerant code sequences by reducing the code sequences by a certain number of bits without losing the reproducibility of noise-tolerant codes has been investigated. Theoretical analysis of the possibilities of this approach and its effectiveness is performed. Several series of experimental studies of the reliability of the described method on different data samples were performed and its functional efficiency was confirmed. The analysis of the obtained results is performed and the main factors influencing the obtained result are determined.

The proposed noise-tolerant barker-like code sequences have practical value, because with the help of the obtained barker-like code sequence it is quite simple and fast to find up to 50 % and correct up to 25 % of distorted characters from the length of noise-tolerant barker-like code sequence.

**Keywords:** barker-like sequence; ideal ring bundle; noise-tolerant sequence; non-equidistant code sequence; non-equidistant combinatorial configuration; mirror code sequence.

### Інформація про авторів:

**Цмоць Іван Григорович**, д-р техн. наук, професор, кафедра автоматизованих систем управління. **Email:** ivan.tsmots@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0002-4033-8618>; ResearcherID: R-2780-2017

**Різник Олег Яремович**, канд. техн. наук, доцент, кафедра інформаційних технологій видавничої справи. **Email:** oleh.y.riznyk@lpnu.ua; <https://orcid.org/0000-0002-3815-043X>; ResearcherID: S-7675-2017

**Бударецький Юрій Іванович**, канд. техн. наук, провід. наук. співробітник, науковий центр Сухопутних військ. **Email:** uriybud@ukr.net; <https://orcid.org/0000-0002-8882-0374>

**Олійник Михайло Ярославович**, ад'юнкт штатний. **Email:** kombat26abr@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0001-9219-0996>

**Цитування за ДСТУ:** Цмоць І. Г., Різник О. Я., Бударецький Ю. І., Олійник М. Я. Синтез баркероподібних послідовностей з адаптацією до величини завади. Український журнал інформаційних технологій. 2021, т. 3, № 1. С. 91–98.

**Citation APA:** Tsmots, I. H., Riznyk, O. Ya., Budaretskyi, Yu. I., & Oliinyk, M. Ya. (2021). Synthesis of barker-like sequences with adaptation to the size of the interference. *Ukrainian Journal of Information Technology*, 3(1), 91–98. <https://doi.org/10.23939/ujit2021.03.091>